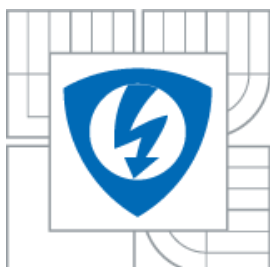




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ VYUŽÍVAJÍCÍ LOKÁLNÍ EMISI SVĚTLA

USAGE LOCAL LIGHT RADIATION FOR THE DIAGNOSTIC METHOD OF PHOTOVOLTAIC CELLS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. JAN DOLENSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

Solární článek, diagnostické metody, mikroplazma, elektroluminiscence.

KEYWORDS

Solar cell, diagnostic methods, microplasma, electroluminescence

Originál práce je uložen na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně.

© Jan Dolenský 2014
ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE PRÁCE	6
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	7
3.1 Měřicí pracoviště.....	7
3.2 Měřené vzorky	7
3.3 Vliv teploty na křemíkový solární článek	8
3.4 Teplotní závislost elektroluminiscence	9
3.5 Mikroplazma	11
3.5.1 Teplotní závislost mikroplazmy.....	12
3.5.2 Vliv okolí na mikroplazmy.....	16
3.6 Korelace výsledků.....	19
3.6.1 Šumové charakteristiky a přenosové vlastnosti solárních článků.....	19
3.6.2 Korelace mikroplazmy s výsledky měření šumu.....	20
4 ZÁVĚR.....	21
5 LITERATURA	24
6 CURRICULUM VITAE	25
7 ABSTRACT	26

1 ÚVOD

Využití sluneční energie provází lidstvo celou jeho historií a je defakto motorem života na Zemi. Člověk se již od pradávny historie učil, jak jeho energii využívat pro svůj prospěch a pomoc při různých procesech. Až do první poloviny 20. století bylo ze Slunce využíváno převážně teplo a světlo k přímému osvětlení. Od druhé poloviny 20. století začíná lidstvo využívat sluneční energii k výrobě elektřiny pomocí fotovoltaického jevu. Tím nastává rozvoj v oblasti fotovoltaiky a otevírají se nové možnosti.

Získávání energie ze Slunce pomocí fotovoltaických článků je aplikováno již několik desítek let. O prvních využitích fotovoltaiky můžeme mluvit v souvislosti s rozvojem výzkumu vesmíru v šedesátých letech 20. století. Dále se fotovoltaika dostala do povědomí širší veřejnosti díky celosvětové ropné krizi. V dnešní době, kdy si lidstvo stále více uvědomuje závislost na fosilních palivech dostává využití fotovoltaiky nový rozměr. Toto je způsobeno především neustále se zvyšující potřebě elektrické energie. Fotovoltaika je jednou z řady alternativních zdrojů elektrické energie a možností jak pokrýt energetické potřeby lidstva v budoucnosti. Důkazem může být celkový instalovaný výkon, který v posledních letech několikanásobně vzrůstá a uplatnění fotovoltaiky se ukazuje i v aplikacích dříve nemyslitelných. S požadovaným výkonem fotovoltaiky rostou i požadavky na kvalitu solárních panelů resp. článků. Se vzrůstající výrobou se posunul i vývoj solárních článků. Ještě před několika lety se udávala účinnost křemíkových solárních článků 13%. V dnešní době se v praxi běžně objevují křemíkové články s účinností kolem 25%. V laboratorních podmínkách se již povedlo vyrobit křemíkový článek s účinností nad 30%. Se zkvalitněním výroby také klesá potřebná energie pro vyrobení jednotlivých článků. Aby bylo možné vyrábět kvalitnější články, je potřeba umět odhalit jednotlivé defekty v materiálu a porozumět příčinám jejich vzniku. Jen tak lze posunout hranici účinnosti komerčně vyráběných článků nad hodnotu 25%.

Diagnostické metody používané při vývoji a výrobě solárních článků lze rozdělit na dvě základní kategorie, dle toho, jakých principů používají. První kategorií jsou metody založené na přímé fotovoltaické přeměně světla v proud či napětí (LBIC, LBIV, flashtest atd.). Druhá kategorie využívá obrácený fotovoltaický jev, při kterém dochází ke generování fotonů v objemu solárního článku. Sem patří elektroluminiscence a sledování mikroplazmy. Mezi speciální techniky lze zařadit šumovou diagnostiku a pozorování struktury článku pomocí optického nebo elektronového mikroskopu.

U všech diagnostických metod je důležitá především rychlost a množství informací, které poskytují. V posledních letech se výzkum zaměřil na metody z druhé kategorie právě pro jejich rychlost a přehledné informace, které poskytují.

2 CÍLE PRÁCE

V oblasti diagnostiky solárních článků existuje řada metod, které se liší dobou nutnou pro získání informací, jejich množstvím a formou. Tato práce je zaměřena na diagnostické metody využívající lokální emisi světla, elektroluminiscenci a mikroplazmu.

Diagnostické metody využívající generaci mikroplazmy nejsou prozatím důkladně popsány a vysvětleny. V souvislosti s aktuálním stavem diagnostických metod vznikla tato práce, která si klade několik cílů.

Prvním z nich je analýza defektů článků pomocí metody mikroplazmy se sledováním vlivu teploty a následná korelace s metodou měření šumu a metodou elektroluminescence. Zjištění vlivu napětí, proudu a teploty na projev jednotlivých defektů může pomoci lépe simulovat provozní podmínky a tím pochopit kolísání účinnosti článků při různých klimatických podmínkách. Výrobci sice garantují degradaci výkonu celých panelů o max. 15% za 25 let ale vlivem změn teplot se mohou některé defekty projevit více a snížit výkon panelu o více než garantovanou mez.

Dalším cílem práce je rozbor vzniku a chování mikroplazmy v solárním článku. Pro správný rozbor tohoto jevu je nutné pochopit a popsat příčiny jeho vzniku spolu s vlivem okolních podmínek, které vznik mikroplazmy v solárním článku ovlivňují. Objasněním vzniku defektů lze lépe upravit a zkvalitnit výrobní postupy od vlastní výroby křemíku až po vytváření PN přechodu a opracování jednotlivých článků. O příčinách vzniku tohoto jevu, který je používán k lokalizaci defektů v materiálu nebylo dosud mnoho informací zjištěno, stejně jako nebylo lokalizováno místo vzniku, resp. příčina v závislosti na jednotlivých typech defektů. Díky této práci bude snažší porozumět tomuto jevu a lépe objasnit projev řady defektů. Pro zjištění vzniku mikroplazmy v solárním článku budou použity techniky založené na přímém sledování materiálu. Pro zjištění a lokalizaci vzniku jednotlivých center mikroplazmy bude použito speciální nízkošumové CCD kamery s kvantovou účinností přes 80%. Tím je možné zachytit i slabé zdroje záření.

Analýza na základě lokální emise světla vyžaduje korelaci z několika různých měření a metodik tak, aby výsledné informace vypovídaly co nejlépe o skutečném stavu materiálu resp. popisovaly co nejlépe defekty v článku. Proto této práci předcházelo měření rozdílnými metodami aby nakonec byly vybrány ty, které poskytují potřebné informace o článku. Výsledky jednotlivých metod budou porovnány a určeny jak výhody jednotlivých metod, tak především objasnění a popis vzniku mikroplazmy v solárním článku a určení závislosti jejího vzniku na okolních podmínkách. Popsané metody budou ověřeny na sérii vybraných vzorků se známými defekty i na nově vyvíjených článcích.

Celkovým výstupem práce bude objasnění příčin vzniku mikroplazmy, popis defektů způsobujících tuto lokální emisi světla a rozbor modelu vzniku v závislosti na podmínkách okolí.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Diagnostika solárních článků existuje od samotného počátku jejich vývoje a výroby. Za desítky let, kdy jsou články vyráběny, byla zavedena řada metod, které určují kvalitu článků a odhalují defekty a poruchy v materiálu. Některé jsou používané běžně ve výrobním procesu a interpretace jejich výsledků je srozumitelná a jasně popsitelná. Jedná se především o měření elektrických parametrů za tmy a za použití solárního simulátoru.

Tato práce má jako jeden z cílů popis a další rozvedení diagnostických metod využívající lokální emisi světla, tzn. hlavně elektroluminiscenci (EL) a mikroplazmu (MP). Hlavní zaměření výzkumu je na projevy jednotlivých defektů při změně okolních podmínek, především závislost na teplotě a na okolní atmosféře. Z měření a analýzy jednotlivých defektů jsou určeny projevy jednotlivých defektů a jejich vliv na provoz celého článku za reálných podmínek. Během výzkumu na monokrystalických článcích se podařilo prokázat teze o vlivu teploty na množství pozorovatelných defektů snižujících výslednou účinnost článku. Výsledky z obou metod jsem dále koreloval s metodou měření šumu. Lokalizované defekty jsem detailně analyzoval skenovacím elektronovým mikroskopem pro zjištění příčiny a objasnění principu projevu jednotlivých defektů.

3.1 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ

Aby bylo možné detekovat luminescenční záření malé intenzity bylo potřeba vyrobit temný box, kde je umístěno kontaktní pole pro solární články a citlivá CCD kamera s filtry pro detekci záření. Pro možnost plynulého ohřevu nebo chlazení měřených solárních článků, jsem vyrobil teplotně regulovatelné kontaktní pole osazené čtyřmi peltierovými články. Toto kontaktní pole bylo zaintegrováno do stávajícího temného boxu pro měření. Rozsah teplot kontaktního pole je od 233K do 363K. Plynulá regulace teploty je zajištěna elektronickým regulátorem s čidly vytvářejících zpětnou vazbu. Pro chlazení a ohřev jsem použil čtyři Peltierovy články o rozměrech 62x62x4,8 mm.

Pro odvod parazitního tepla Peltierových článků jsem navrhnul systém vodního chlazení. Použité Peltierovy články M-TEC1-12730 produkují při chlazení na 243K přibližně 280W ztrátového tepla každý, celkem tedy 1120W ztrátového tepla, které je potřeba odvést do okolí mimo měřený solární článek. Vodní chlazení jsem zkonstruoval pomocí čtyř chladících bloků připojených k odvětrávanému výměníku tepla. Jako přenosové medium byla použita deionizovaná voda s příměsí proti korozi materiálu spojek a roztok proti růstu vodních řas. Oběh chladicí vody v systému byl zajištěn pomocí čerpadla spojeného s expanzní nádobou.

3.2 MĚŘENÉ VZORKY

Pro výzkum v oblasti diagnostických metod využívajících lokální emisi světla jsem použil solární články z monokrystalického křemíku, převážně velikosti 5“, od společnosti Solartec s.r.o. Testované solární články mají tloušťku od 200μm do

250 μ m. Substrát je tvořen p typem polovodiče, dotovaný bórem a n typ je dotován fosforem v plynném prostředí. Antireflexní vrstva na povrchu článků je vytvořena nitridem.

Prvotní výzkum jsem prováděl na vzorcích, které byly již v minulosti testovány metodou LBIC a byl u nich znám typ a poloha defektu. Tím bylo možné ověřit základní funkcionalitu diagnostických metod EL a MP. Po nastavení a ucelení postupu měření jsem pro další výzkum využil články jak z běžné výroby, tak články prototypové, u kterých se zjišťovala míra vlivu inovace výrobního postupu a technologie výroby na celkový počet defektů a vlastnosti článku.

První velkou skupinou byl soubor dvaceti článků (sada A) dodaných ihned po výstupu z výroby. Tyto články jsem proměřil metodami elektroluminiscence a mikroplazmy za standardních okolních podmínek. U měřených článků v této sadě byl nejčastější vadou vírový defekt a poškozená pasivace na hranách. Na polovině měřených vzorků jsem také pozoroval nedokonalé kontaktování části povrchu článků. Pro měření v závislosti projevů defektů na proudu, napětí a teplotě jsem vybral články, které vykazovaly nejvíce oblastí mikroplazmy a přitom měly rozdílnou velikost plochy vírového defektu.

Pro porovnání výsledků metody mikroplazmy a měření šumu byly zvoleny tři sady článků, s označením G1, G3 a G5, na základě spolupráce s firmou Solartec. Vzorky ze sady G1 byly vytvořeny standardním procesem. Pohmožděná vrstva byla odstraněna a báze článku byla oboustranně strukturována alkalickým leptáním. Vzorky skupiny G3 byly vyrobeny v základu standardním postupem, pouze s tím rozdílem, že pro leptání zadní strany byla použita kyselina. U měřených vzorků skupiny G5 byla kyselina použita pro leptání struktury z obou stran.

Protože jedním z cílů této práce je důkladné studium defektů, upravil jsem vybrané vzorky ze sady A do rozměrů umožňující analýzy ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Při dělení bylo nutné nepohmoždit povrch článku v místě lomu. Při zkušebním řezu diamantovým kotoučem docházelo k vytváření zkratů mezi přední a zadní stranou. Proto jsem nakonec zvolil metodu lámání. Při této metodě byly nově vzniklé hrany bez nežádoucích defektů a nedošlo tak k ovlivnění měření defektů ve vybraném vzorku článku.

3.3 Vliv teploty na křemíkový solární článek

Tato práce si klade za jeden z cílů vysvětlit vliv teploty na projevy defektů v solárních článcích. Aby bylo možné správně interpretovat výsledky získané měřením, je potřeba znát základní teorii o vlivu teploty na článek za běžného provozu.

Pro celkový výkon článku jsou rozhodující I_{SC} , proud na krátko, U_{OC} , napětí na prázdno a FF, Fill factor. Proud na krátko není výrazně na teplotě závislý a se vzrůstající teplotou roste v jednotkách procent, což má souvislost s rostoucí absorpcí světla. Další dva parametry jsou nepřímo ovlivňovány teplotou, se zvýšením teploty se jejich hodnota zmenšuje. Pro proud na krátko lze úpravou vzorce pro proud článku získat výraz pro analýzu vlivu teploty:

$$I_{sc} = A T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU_{oc}}{kT}\right), \quad (1)$$

kde A je teplotně nezávislá konstanta, E_{G0} je lineární extrapolace šířky zakázaného pásu při $T=0$, γ zahrnuje teplotní závislost ostatních parametrů I_0 a nabývá hodnoty v intervalu $\langle 0,4 \rangle$. Diferenciací vztahu za podmínek:

$$U_{G0} = -\frac{E_{G0}}{q}, \quad (2)$$

získáme vztah pro vliv teploty na napětí na prázdno:

$$\frac{d U_{oc}}{d T} = -\frac{U_{G0} - U_{oc} + \gamma \left(\frac{kT}{q}\right)}{T}. \quad (3)$$

Tento vztah předpokládá lineární pokles U_{oc} s teplotou. Pokud do vzorce dosadíme hodnoty pro křemík ($U_{G0} \sim 1,2V$, $U_{oc} \sim 0,6V$ a $\gamma \sim 3$) a předpokládaná teplota je 300K, dostáváme jednoduchou závislost pro monokrystalický křemíkový článek:

$$\frac{d U_{oc}}{d T} = -2,3 \text{ mV/K}. \quad (4)$$

Napětí na prázdno v křemíku se tedy snižuje s každým nárůstem teploty o 1K přibližně o 0,4%. Fill factor je spojený s napětím na prázdno, a proto celková účinnost článku se vzrůstající teplotou klesá.

3.4 TEPLITNÍ ZÁVISLOST ELEKTROLUMINISCENCE

Metoda elektroluminiscence je jedním z trendů diagnostických metod. Princip metody vychází z podstaty světla emitujících diod (LED). Solární článek se po připojení do elektrického obvodu stává velkoplošnou LED a zářivé rekombinace nosičů v PN přechodu emitují záření ve viditelném spektru. V křemíkovém solárním článku, jakožto polovodič s nepřímým zakázaným pásem, je většina rekombinací způsobena defekty nebo Augerovými rekombinacemi. Množství mezipásmových rekombinací produkujících zářivou emisi je relativně malé. Přesto toto malé množství stačí k detekci vhodným snímačem, obvykle citlivou CCD kamerou. Výsledný snímek metody je zobrazení plochy článku ve stupních šedi, kde jsou defekty reprezentovány tmavší hodnotou šedé. Do celkového signálu elektroluminiscence (EL) vstupují tři základní složky, se kterými je při důkladnějším vyhodnocení potřeba počítat. Výsledný fotonový proud EL vychází z lokálního rozdělení kvazi Fermiho hladin $E_{Fn} - E_{Fp}$ a ze vztahu:

$$\Phi_{EL} \propto \int_0^w U_{rad} dz = \int_0^w B p n_{dz} = n_i^2 \int_0^w B \left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_B T}\right) dz, \quad (5)$$

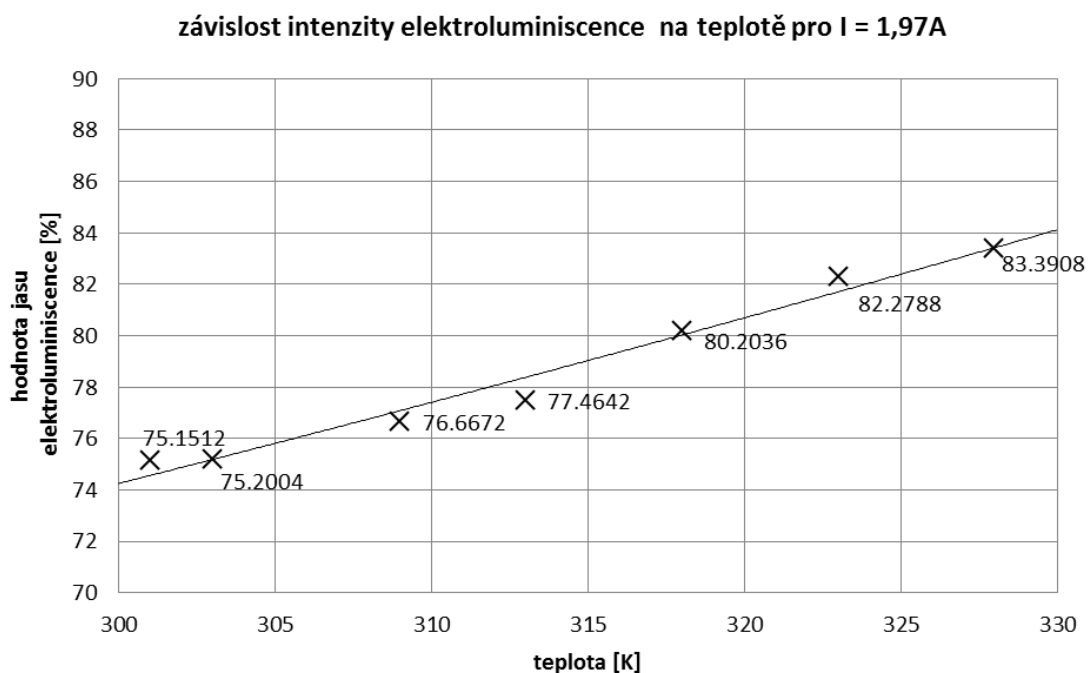
kde w je tloušťka článku, U_{rad} je rychlost zářivé rekombinace a B je rekombinační koeficient. Přivedeným potenciálem dochází ke zúžení zakázaného pásu a PN přechod je více dopován emitory a BSF je porovnávána se základnou. I proti malé tloušťce zakázaného pásu a BSF je příspěvek do celkového EL záření velký. Rekombinační koeficient B je silně závislý na koncentraci volných nosičů náboje a výrazně klesá se vzrůstající koncentrací. Při zvážení obou efektů, lze ze vzorce určit zářivou rekombinační rychlost U_{rad} .

Hlavní výhodou metody EL je rychlost a opakovatelnost měření. Pomocí metody EL lze lokalizovat defekty v celé ploše článku a získat informaci o kvalitě materiálu a výrobního procesu

Výzkumem a měřením byla určena teze o teplotní závislosti elektroluminiscence solárního článku. Teplotní závislost elektroluminiscence solárních článků jsem měřil v rozmezí teplot 303K až 328K.

Aby bylo možné relevantně vyhodnotit vliv teploty na intenzitu elektroluminiscence článku, vytvořil jsem algoritmus v programu Matlab, váhující hodnotu jasu každého pixelu snímku. Pro zpracování je nutné získané snímky oříznout na stejnou velikost, v tomto případě na rozměry 500x500 pixelů. Snímky jsou následně převedeny do matice hodnot a váhovacím algoritmem je určena stupeň šedé, resp. černé nebo bílé a tím procentuální zastoupení defektů v ploše článku a intenziti elektroluminiscence článku.

Následující výsledky reprezentují výrovní defekt v solárním článku 4 ze sady A, měřený v intervalu teplot 301K až 328K a proudu 1,97A.



Obr. 1. – Závislost intenzity elektroluminiscence na teplotě pro $I = 1,97A$, vzorek 4 (sada A).

Výsledný graf závislosti intenzity elektroluminiscence na teplotě představuje výsledky měření článku 4 sady A. Výsledná závislost vykazuje téměř lineární charakter. Z průběhu spojnice trendu jednotlivých naměřených hodnot lze predikovat intenzitu elektroluminiscence v celém spektru, především v oblasti nízkých teplot.

U [V]	I [A]	T [K]	jas EL [%]
1.2	1.97	301	75.1512
1.2	1.97	303	75.2004
1.2	1.97	309	76.6672
1.2	1.97	313	77.4642
1.1	1.97	318	80.2036
1.1	1.97	323	82.2788
1.1	1.97	328	83.3908

Tab. 1 – Závislost intenzity elektroluminiscence na teplotě, vzorek 4 (sada A).

Další měřené články ze sady A vykazovali podobnou závislost na teplotě. Díky absenci výraznějších defektů však nebyly zajímavé pro další měření metodou elektroluminiscence.

3.5 MIKROPLAZMA

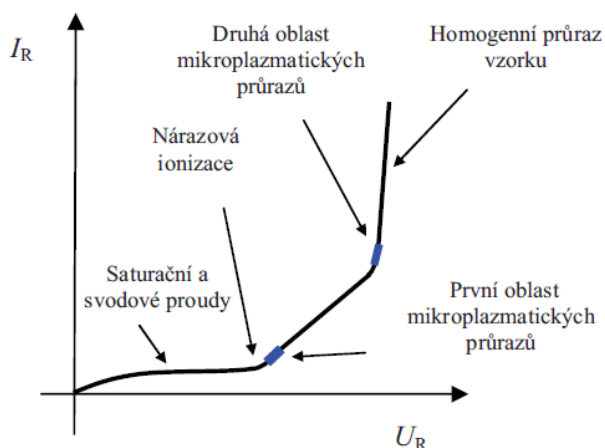
Při vycházení z předpokladu, že solární článek je velkoplošná dioda, lze projevy mikroplazmy popsat pomocí teorie určené pro měření defektů PN přechodů diod [2]

Pokud popsáné chování PN přechodu diody budeme integrovat přes celou plochu solárního článku a můžeme tak získat prvotní informaci o jeho kvalitě, resp. počtu defektů v celém objemu. Jednou skupinou defektů produkujících mikroplazmu jsou dislokace v krystalové mřížce křemíku. Může se jednat buď o vícečetnou vazbu na jiný druh příměsy (nečistoty) nebo častěji o mechanicky narušenou strukturu na povrchu článku nebo jeho hranách. K narušení struktury na povrchu dochází obvykle špatnou manipulací. Defekty vzniklé mechanickým poškozením jsou v časovém měřítku stabilní a se zvyšováním závěrného napětí se počet pozorovaných defektů nemění, vzrůstá pouze intenzita mikroplazmy. Jsou pozorovatelné už při nízkém závěrném napětí. Mikroplazma vzniklá v místech mechanického poškození je v celkové ploše solárního článku rozhodující, protože se obvykle jedná o poruchy větších rozsahů. Tím je značně snížena možnost rekombinace nábojů na PN přechodu a tím dochází ke snížení celkové účinnosti. V případě mechanického poškození napříč kontakty je vliv ještě více pozorovatelný, protože k dochází odpojení části článku.

Příčin vzniku mikroplazmy existuje několik. Cílem této práce je objasnění vzniku mikroplazmy po technologické stránce. Mikroplazma jako taková má několik fází vzniku, podle velikosti závěrného napětí, jak je vidět z obrázku 2. První oblast průběh, saturační a svodové proudy, je oblast, která je detekovatelná šumovými měřeními.

První mikroplazmy se projevují v oblasti nárazové ionizace. Teze emise světla je taková, dochází ke světelné emisi v místech poškození PN přechodu. Aby mohla vzniknout mikroplazma, musí být přítomen materiál, který je ionizován. V případě monokrystalických solárních článků by se mohlo jednat o nečistoty. Tato teze bude potvrzena v praktické části.

Druhá oblast mikroplazmy nastává při zvýšení závěrného napětí a vyznačuje se zvýšením závěrného proudu měřeným článkem. Tato oblast je pro PN přechod riziková, protože mikroplazma může lehce přejít k destruktivnímu průrazu. Proto je vhodné během měření používat proudové omezení na zdroji na hodnotu, která se vztahuje k ploše resp. počtu defektů na ploše článku. Pro monokrystalický křemíkový článek velikosti 5“ je bezpečná hodnota proudu v závěrném směru cca 1A.



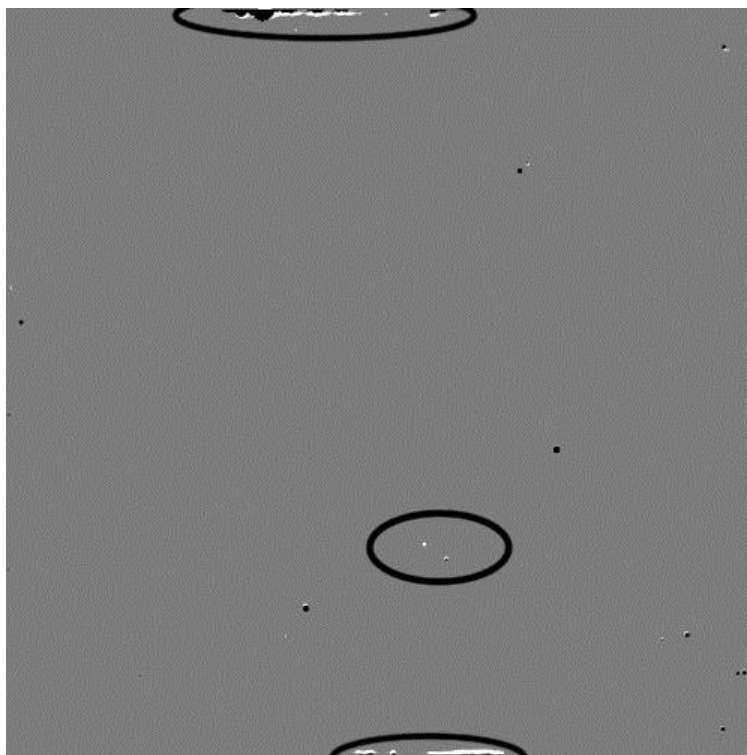
Obr. 2. – Schematické znázornění průrazných procesů při elektrickém namáhání v závěrném směru [2].

3.5.1 Teplotní závislost mikroplazmy

Výzkumem a měřeními bylo prokázáno, že projevy jednotlivých defektů při sledování mikroplazmy vykazují teplotní závislost. Prvotním záměrem měření v teplotním spektru od 273K do cca 338K bylo co nejlépe simulovat reálné provozní podmínky solárních článků. Při detailním měření jsem zjistil, že při konstantní hodnotě závěrného napětí a konstantním proudu článkem dochází k nárůstu proudu při zvýšení teploty. Detailní zkoumání jednotlivých článků z kamery skutečně potvrdilo zvýšený počet oblastí s viditelnou mikroplazmou. Aby bylo vyhodnocení měření jednoznačné, vytvořil jsem algoritmus v programu Matlab, pro zpracování naměřených snímků. Při rovnoměrném zahřátí článku dochází ke zvýšení vnitřní energie valenčních elektronů. Tím je pro vyvolání lavinového průrazu a vzniku mikroplazmy potřeba menšího závěrného napětí.

Pro měření teplotní závislosti jsem vybral článek č. 6 sady A, protože vykazoval kromě defektů na hranách i mikroplazmy v ploše. Testovaný článek jsem postupně měřil CCD kamerou při zvyšování napětí při konstantní teplotě 303K. Při závěrném napětí 12V jsem uložil snímek mikroplazem článku. Poté byla teplota článku zvýšena a temperována až na 338K. Po ustálení teploty jsem uložil druhý snímek

mikroplazem, stále při stejném závěrném napětí, 12V. Uložené snímky jsem upravil Matlabem do matice hodnot. Po invertování snímku a lokalizace center mikroplazmy jsem vytvořil výsledné překrytí těchto matic hodnot pro lepší přehlednost pro rozdílné teploty. Z obrázku jsou vidět změny velikosti mikroplazmy při zvýšené teplotě. Mikroplazmy měřené při teplotě 303K mají černou barvu, mikroplazmy měřené při 338K mají bílou barvu.

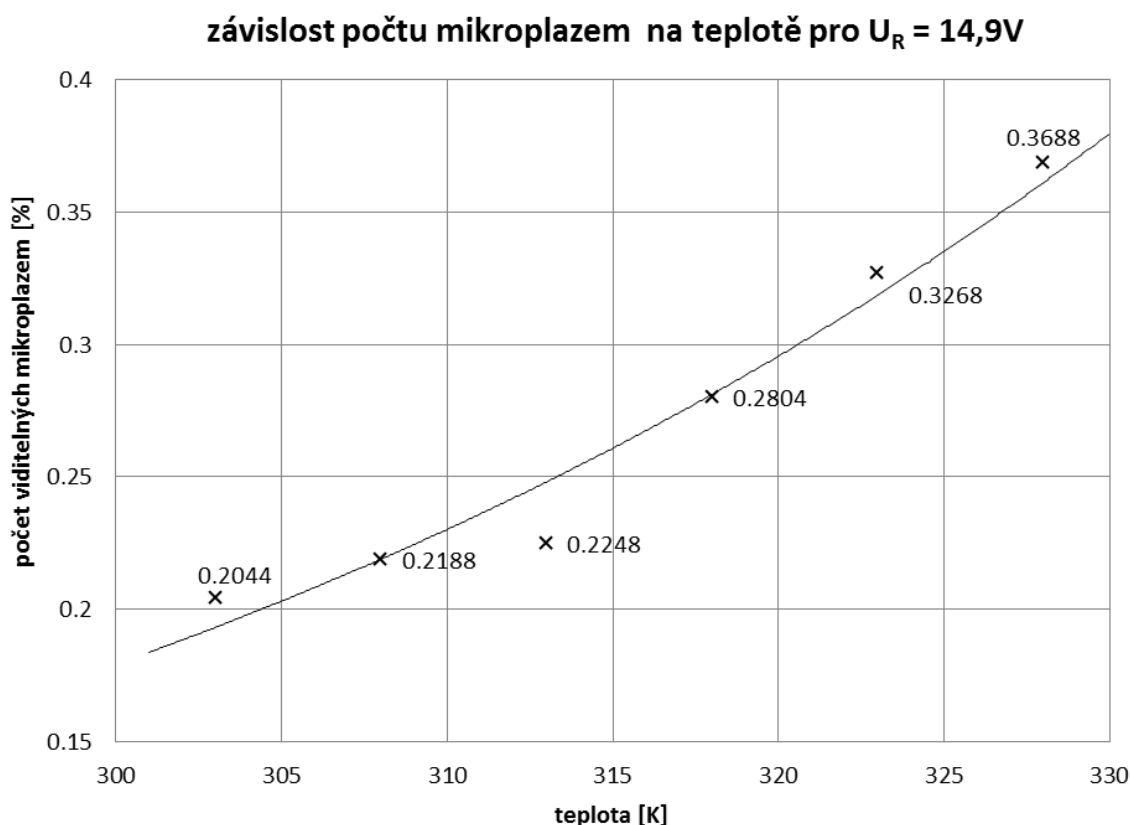


Obr. 3. – Mikroplazma – teplotní závislost, měření při rozdílných teplotách, 303K (černá barva), 338K (bílá barva), závěrné napětí 12V.

Abych potvrdil tezi o teplotní závislosti počtu mikroplazem v solárním článku, provedl jsem na člancích měření při více teplotách. Pro porovnání uvádím výsledná data z článku č.6 sady A. Teplotní závislost jsem měřil při závěrném napětí 14,9V. To jsem zvolil s ohledem na experimentální měření, kdy se mikroplazmy v ploše začaly výrazněji projevovat až nad 14V. Měření počtu mikroplazem probíhalo v rozmezí teplot 303K až 328K, při závěrném napětí $U_R = 14,9V$. Rozsah teplot jsem zvolil ze souboru statistických hodnot dlouhodobého měření teploty panelů na FVE. V praktických podmínkách se teplota článků pohybuje nejčastěji právě v tomto rozmezí.

Naměřené hodnoty počtu mikroplazem při jednotlivých teplotách jsem proložil exponenciální spojnici. Jelikož je výsledná směrnice exponenciálního tvaru, lze na na vliv teploty aplikovat Boltzmannovu rovnici:

$$k(T) = A_K \exp\left(-B \frac{U}{kT}\right), \quad (6)$$



Obr. 4. – Teplotní závislost počtu mikroplazem při napětí 14,9V pro vzorek 6 sada A.

kde $k(T)$ je počet zdrojů mikroplazmy v celé ploše solárního článku. Konstanty A a B jsou materiálové a technologické konstanty měřeného článku a jsou určeny směrnici křivky grafu. Pro článek v grafu je konstanta A rovna $1,0 \cdot 10^{-4}$ a konstanta B má hodnotu 0,025 eV. Po dosazení hodnot parametrů exponenciální spojnice dostáváme parametry solárního článku. Tím lze charakterizovat měřený solární článek a predikovat další vývoj počtu defektů v celém teplotním spektru.

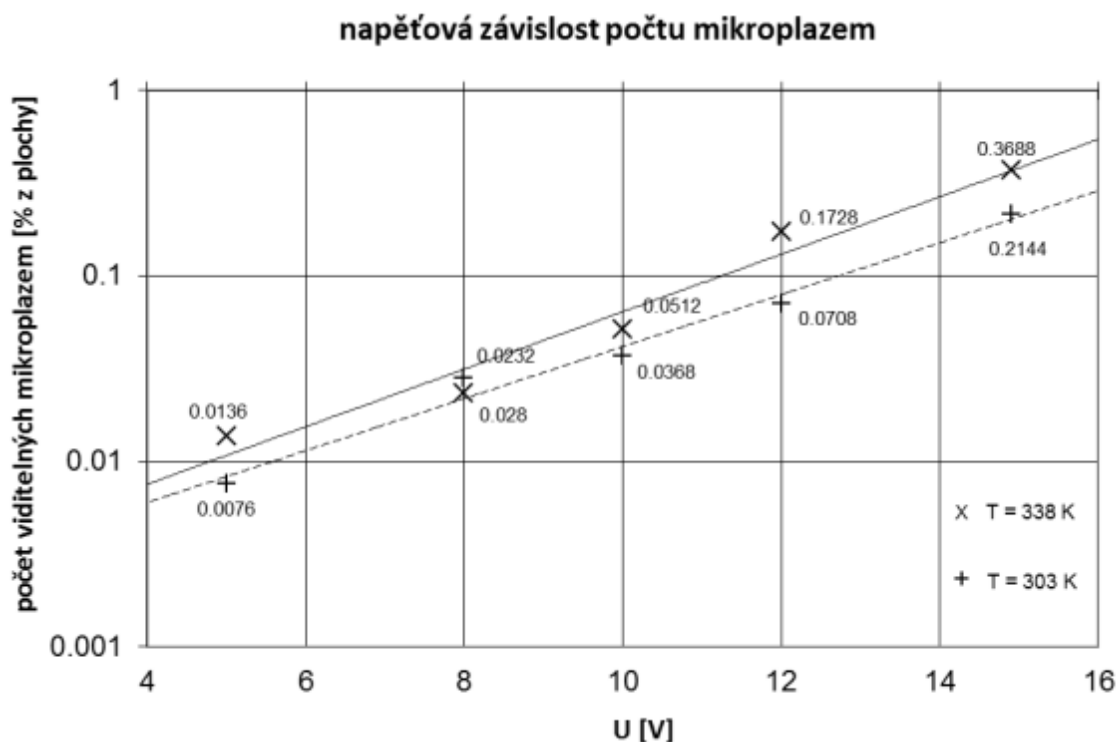
$$\text{defekty} = 1,0 \cdot 10^{-4} \exp\left(-0,025 \cdot \frac{U}{kT}\right) [\% \text{ z plochy}], \quad (7)$$

kde U je hodnota závěrného napětí článku, k je Boltzmannova konstanta a T je teplota měřeného článku v kelvinech.

U [V]	I [A]	T [K]	počet viditelných mikroplazem [% z plochy]
14.9	0.57	303	0.2044
14.9	0.6	308	0.2188
14.9	0.65	313	0.2248
14.9	0.9	318	0.2804
14.9	1	323	0.3268
14.9	1	328	0.3688

Tab. 2 – Závislost počtu viditelných mikroplazem na teplotě solárního článku, vzorek 6 (sada A).

Aby byla teze o teplotní a napěťové závislosti počtu viditelných defektů důkladně potvrzena, provedl jsem další sérii měření při různých závěrných napětích, ale pouze při dvou zvolených teplotách, 303K a 338K. Získané snímky z CCD kamery jsem opět zpracoval algoritmem pro určení procenta defektů z plochy článku.



Obr. 5. – Napěťová závislost počtu viditelných mikroplazem, při dvou úrovních teploty, vzorek 6 (sada A)

Výsledný graf zobrazuje závislost počtu defektů na závěrném napětí. Parametrem průběhu naměřených hodnot je teplota. Závislost na závěrném napětí je výrazně exponenciálního tvaru a lze ji definovat na základě Boltzmannovy rovnice (6). Po odečtení hodnot směrnice lze Boltzmannovu rovnici převést do tvaru platného pro určení počtu defektů v solárním článku:

$$defekty = 1,7 * 10^{-3} \exp \left(-9,395 * 10^{-3} \frac{U}{kT} \right) [\% \text{ z plochy}]. \quad (8)$$

Z rovnic 7 a 8 je možno pozorovat, že závislosti na teplotě a závěrném napětí jsou exponenciální. Při porovnání chování článku pro obě teploty je zřejmá symetrie vlivu teploty na počet viditelných defektů.

Teze o teplotních a napěťových závislostech jsem během výzkumu publikoval v časopisech mezinárodních konferencí [SPIE (Proceedings of SPIE; ISSN: 0277-786X) pod názvem Diagnostic methods of solar cells in dependence on temperature a v časopisu organizace ECS (ECS Transactions; ISSN: 1938- 5862) pod názvem Diagnostic Methods of Solar Cell Based on Temperature Dependence].

3.5.2 Vliv okolí na mikroplazmy

Vliv teploty a napětí na počet viditelných defektů popsany v předchozí části je pouze jednou skupinou faktorů ovlivňující vznik mikroplazmy v solárním článku. Testované články ze skupiny A jsem po upravení na vhodné rozměry vložil do vakuové komory skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), aby bylo možné sledovat vznik mikroplazmy za různých okolních podmínek a detailně lokalizovat místo na článku, kde mikroplazma vzniká. Teplota měření byla stabilní, 260K, měnilo se však plynné složení v okolí článku. Články jsem nejdříve měřil v běžné atmosféře, poté ve vakuu s tlaky řádově $1 \cdot 10^{-2}$ Pa až $5 \cdot 10^{-4}$ Pa a na konec v plynném dusíku N₂. Pro měření mikroplazem jsem použil stejnou CCD kameru (G2-3200) jako u předchozích měření, aby výsledné snímky byly porovnatelné.

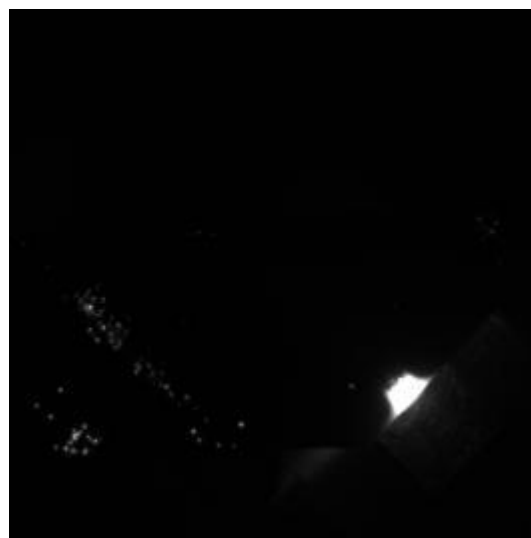
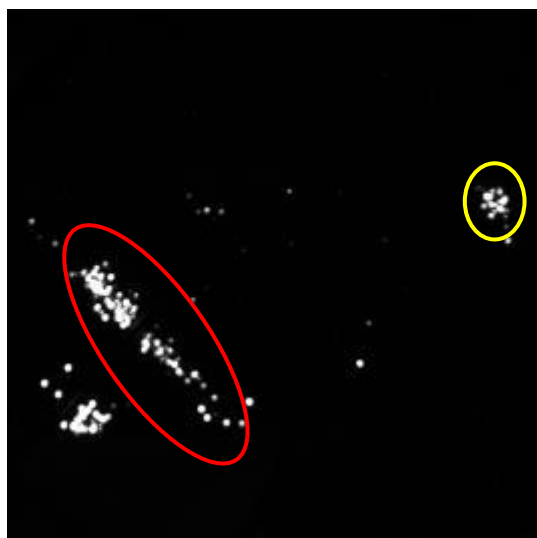
Během testů jsem nejdříve určil vhodnou hodnotu závěrného napětí, při kterém vzniká mikroplazma detekovatelná CCD kamerou. Toto napětí bylo udržováno, zatímco byl vyčerpáván okolní prostor sledovaného článku. Po určité době, která závisela na počtu defektů a velikosti článku, došlo současně s poklesem tlaku v komoře mikroskopu k nárustu proudu tekoucího článkem a rozvinutí tepelného průrazu v místě s nejvyšším počtem poruch. S postupným poklesem tlaku bylo potřeba kratší doby ke vzniku mikroplazmy a následného tepelného průrazu. Tabulka shrnující výsledky měření obsahuje jak podmínky v komoře (vakuum, atmosféru nebo dusík), tak napětí a proud při pozorování a především čas, po který byl článek sledován. Pokud při sledování došlo k průrazu, je u času označení P.

číslo vzorku	vakuum [Pa] / atmosféra/ N ₂	napětí [V]	proud [A]	čas pozorování (P - do průrazu) [min:sec]	detekována mikroplazma [ANO/NE]	tepelný průraz [ANO/NE]
1	atm	15	0.09	11:00	ANO	NE
1	$6.55 \cdot 10^{-3}$	12	0.09	1:51 (P)	ANO	ANO
1	N ₂	15	0.13	4:00	ANO	NE
2	atm	20	0.12	5:10	ANO	NE
2	$1.65 \cdot 10^{-3}$	20	0.12	0:18 (P)	ANO	ANO
3	atm	16	0.15	7:00	ANO	NE
3	$2.00 \cdot 10^{-2}$	16	0.17	0:10 (P)	ANO	ANO
4	atm	22	0.09	7:00	ANO	NE
4	$4.12 \cdot 10^{-2}$	20	0.08	0:40 (P)	ANO	ANO
4	N ₂	20	0.08	5:00	ANO	NE
5	atm	16	0.28	7:30	ANO	NE
5	$1.38 \cdot 10^{-3}$	14	0.18	0:53 (P)	ANO	ANO
6	atm	20	0.22	5:00	ANO	NE
6	$1.48 \cdot 10^{-3}$	20	0.21	0:19(P)	ANO	ANO

Tab. 3 – Vliv okolních podmínek na vznik a projev mikroplazmy.

Výsledky měření potvrzují tezi, že ke vzniku mikroplazmy nedochází ve vzduchu a nejedná se o plazmatický výboj v pravém slova smyslu. Plazma, někdy též nazývána čtvrté skupenství, je dle fyzikálního výkladu ionizovaný plyn, složený z iontů a elektronů odtržených z elektronového obalu atomů látky (plynu), o vysoké teplotě.

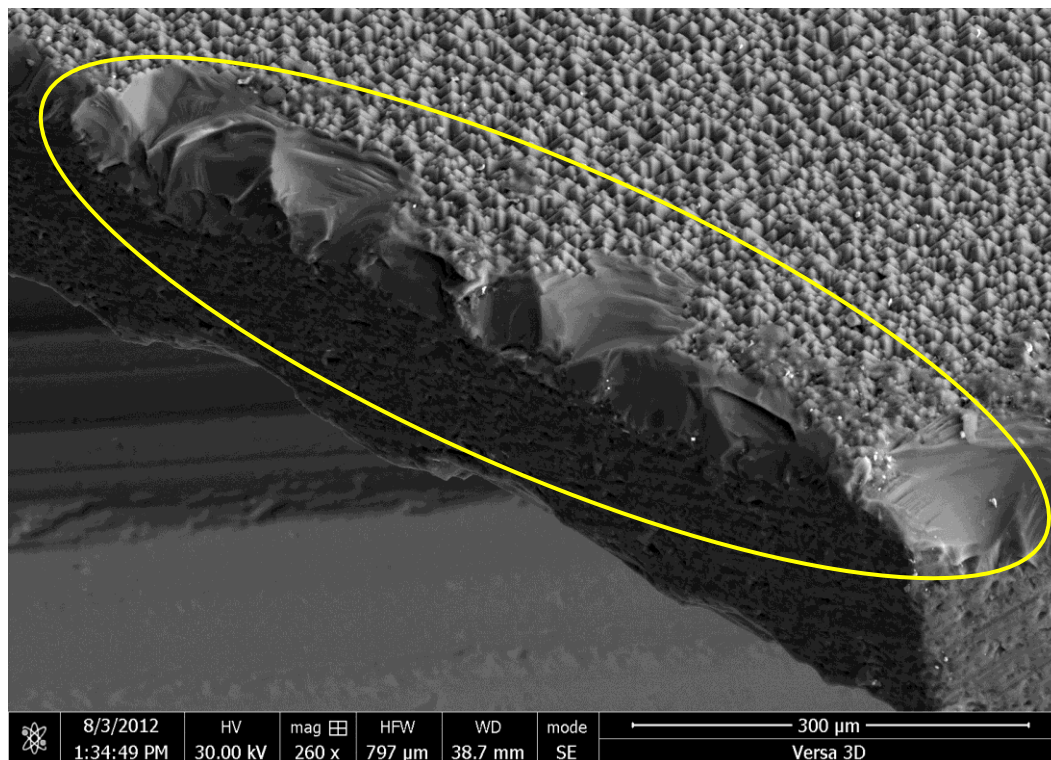
V případě solárních článků jsem výzkumem a měřením zjistil, že místa vykazující mikroplazmu jsou na povrchu vždy alespoň lehce znečištěna nebo je mechanické poškození PN přechodu natolik výrazné, že dochází ke vzniku výboje přímo již při nízkém závěrném napětí. Experimentální měření dále ukazuje, že vzduch kolem testovaného článku působí jako chladící médium, které zabraňuje vzniku tepelného průrazu. Pokud je v okolí článku snížen tlak, není článek chlazen a nejsilnější lavinové průrazy přecházejí do tepelného průrazu. Nejenže dochází k destrukci PN přechodu, ale také dochází k poklesu intenzity záření ostatních oblastí mikroplazmy z důvodu nerovnoměrného proudového rozložení. Následující snímky ukazující vliv okolní na průběh mikroplazmy až po vznik tepelného průrazu. Měřené články jsem ihned po měření podrobil detailní analýze elektronovým svazkem, abych odhalil příčiny vzniku mikroplazmatických výbojů. Pro lepší představení projevů defektů je možné vidět na následující sérii obrázků mikroplazmu a poškozená místa vzorku 6.



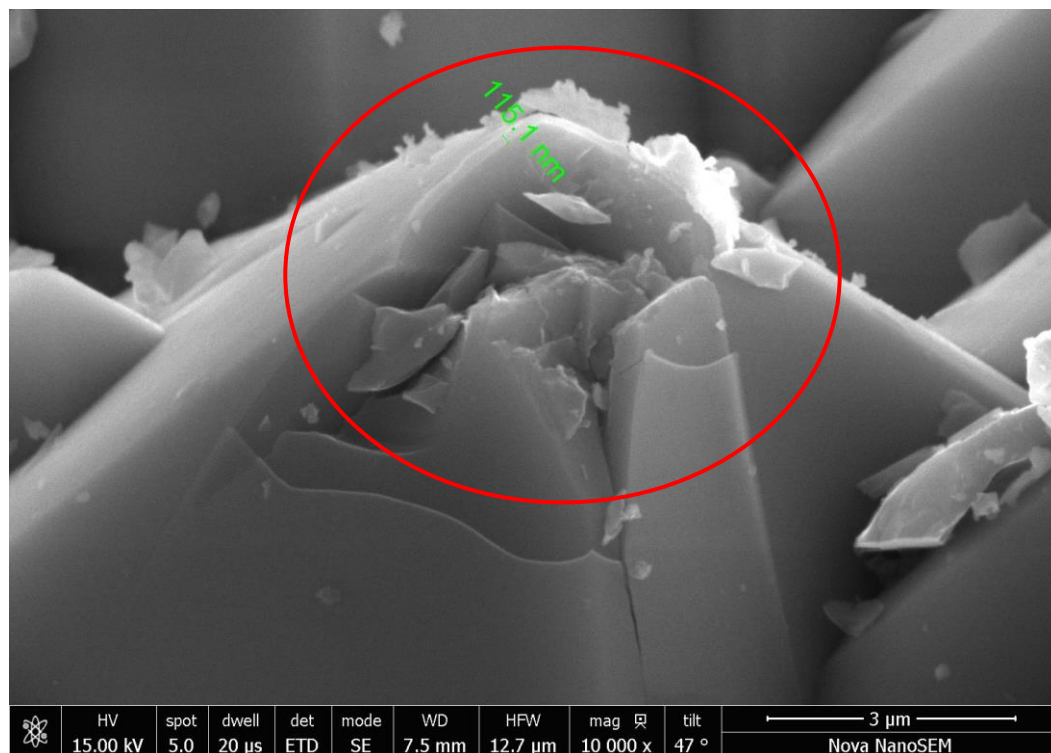
Obr. 6.a – Vzorek 6 – atmosféra, 20V, **Obr. 6.b** – Vzorek 6 – vakuum, 20V, 0,21A, 0,22A.

Snímky vzorku 6 přehledně ukazují vývoj mikroplazmy v atmosféře a vakuu. Při atmosféře v okolí článku probíhají generačně-rekombinační procesy a vznik mikroplazmy. Po odčerpání okolního vzduchu a vzniku vakua dochází k výraznému nárůstu proudu v jedné jediné oblasti, kde později dochází k tepelnému průrazu. Vlivem nerovnoměrného rozložení proudu intenzita ostatních oblastí s mikroplazmou výrazně klesá. Snímek z elektronového mikroskopu zobrazuje oblast pravého horního rohu článku (žlutě vyznačená oblast). Zde je opět vidět řada míst poškození povrchu a PN přechodu článku. Červeně vyznačená oblast byla silně mechanicky poškozena během výroby a došlo k narušení pyramidové struktury na povrchu článku. Pro detailní pozorování jsem vybral jednu z pyramid, na které byla

viditelná vrstva pasivace PN přechodu. Na obrázku 8 je vidět detail poškozené pyramid, která má tloušťku pasivace PN přechodu v místě poškození přibližně 115nm.



Obr. 7. – Vzorek 6 – detail poškozeného rohu článku a obnažení PN přechodu.



Obr. 8. – Vzorek 6 – detail poškozené pyramid článku a obnažení PN přechodu.

3.6 KORELACE VÝSLEDKŮ

Pro korelaci projevu zářivých rekombinací – mikroplazmy jsem použil právě měření šumových charakteristik solárních článků. Jedině tak lze prokázat souvislost mezi mikroplazmou detailně popsanou v [1] na malé ploše PN přechodu a projevy mikroplazem s vyšší koncentrací na plochu v solárním článku. Při vzniku mikroplazmy dochází ke vzniku šumu, který je dvoustavový, jak bylo pro jednoduchost vysvětlení použito, u malého PN přechodu s jedním centrem mikroplazmy. Pokud se však zaměříme na celý solární článek, jehož plocha je obvykle 100cm^2 , dostáváme při měření šum v celém spektru frekvencí.

Pro měření šumu byly v rámci výzkumu nových typů článku použity prototypy s označením G1, G3 a G5 ze společnosti Solartec s.r.o. Články ze tří různých sérií byly vytvořeny následujícím způsobem. Přední poškozená vrstva byla alkalicky odleptána na bázi oboustranného strukturování. Poté byla oboustrannou difúzí vytvořena vrstva N⁺. Dále je použita tenká vrstva nitridu křemíku Si₃N₄. Na závěr je nanесena silná vrstva kovu pro možnost kontaktování článku.

3.6.1 Šumové charakteristiky a přenosové vlastnosti solárních článků

Testované články z výrobních řad G1, G3 a G5 byly postupně proměřeny několika metodami na určení spektrální hustoty šumu a jeho závislosti na napětí a frekvenci.

Vzorek	I_e/A	β/V^{-1}	R_{SH}/Ω	R_s/Ω	S_{UMX}/V^2s	S_{URS}/V^2s
G1/1	$2.5 \cdot 10^{-2}$	18.70	532	0.095	$3 \cdot 10^{-15}$	$8 \cdot 10^{-16}$
G1/4	$3 \cdot 10^{-2}$	18.72	645	0.092	$8 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}$
G1/5	$7 \cdot 10^{-3}$	18.64	106	0.086	$7 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-16}$
G1/7	$8 \cdot 10^{-3}$	18.67	143	0.088	$8 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-16}$
σ	$1.7 \cdot 10^{-2}$	18.68	356	0.0902	$3.1 \cdot 10^{-15}$	$8 \cdot 10^{-16}$
Vzorek	I_e/A	β/V^{-1}	R_{SH}/Ω	R_s/Ω	S_{UMX}/V^2s	S_{URS}/V^2s
G3/1	$8 \cdot 10^{-4}$	19.10	202	0.083	$9 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-16}$
G3/3	$7 \cdot 10^{-4}$	19.14	197	0.081	$8 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-16}$
G3/5	$7 \cdot 10^{-4}$	19.18	126	0.075	$4 \cdot 10^{-16}$	$9 \cdot 10^{-17}$
G3/7	$1 \cdot 10^{-3}$	19.22	94	0.072	$1.5 \cdot 10^{-18}$	$9 \cdot 10^{-17}$
σ	$8 \cdot 10^{-4}$	19.16	129	0.078	$5.6 \cdot 10^{-16}$	$9.5 \cdot 10^{-17}$
Vzorek	I_e/A	β/V^{-1}	R_{SH}/Ω	R_s/Ω	S_{UMX}/V^2s	S_{URS}/V^2s
G5/1	$1 \cdot 10^{-2}$	18.91	216	0.085	$1.5 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-16}$
G5/3	$9 \cdot 10^{-3}$	18.94	203	0.084	$1 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-16}$
G5/5	$6 \cdot 10^{-3}$	18.97	98	0.079	$8 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-16}$
G5/7	$7 \cdot 10^{-3}$	18.95	132	0.080	$7 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-16}$
σ	$8 \cdot 10^{-3}$	18.94	162	0.082	$1 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-16}$

Tab. 4 – Naměřené hodnoty přenosových vlastností a šumu pro vzorky řad G1, G3 a G5.

Naměřené výsledky jsem koreloval se snímky z CCD kamery pro ověření rozsahu defektů v měřených člancích. Na člancích byly postupně změřeny VA charakteristiky v propustném směru, hustoty šumu v závislosti na propustném napětí a spektrální hustota napěťového šumu v závislosti na frekvenci. Hodnoty z jednotlivých měření jsou v souhrnné tabulce 4.

Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že nejlepší parametry v přenosové i šumové oblasti má skupina vzorků G3. Průměrná naměřená hodnota sériového odporu je $R_{SH} = 129\Omega$, která odpovídá nejmenší průměrné hodnotě při nárstu šumového proudu, $I_e = 8 \cdot 10^{-4} A$. Průměrná hodnota sklonu křivky proudu v generačně-rekombinační oblasti článku je $\beta_1 = 19,16 V^{-1}$. Vzorky ze skupiny G3 také vykazují nejnižší hodnotu odporu přívodních kontaktů, s průměrnou hodnotou $R_s = 0,078\Omega$. Výsledné hodnoty měření šumu korelují s přenosovými charakteristikami článků. Průměrná hodnota spektrální hustoty napětí, měřená při napětí $U_F = 0,22V$, je $S_{UMX} = 5,6 \cdot 10^{-16} V^2s$. Průměrná hodnota spektrální hustoty napětí, při napětí $U_{FI} = 0,8V$, která charakterizuje kvalitu přívodních kontaktů, je $S_{URS} = 9,5 \cdot 10^{-16} V^2s$.

Oproti tomu jsou na druhé straně nejhorší výsledky, pro obě skupiny měřených parametrů, které vykazují vzorky ze skupiny G1. Průměrná hodnota sériového odporu vzorků je $R_{SH} = 356\Omega$, z toho nejvyšší naměřená hodnota je u vzorku G1/4 a to $R_{SH} = 645\Omega$. To odpovídá průměrné hodnotě proudu $I_e = 1,7 \cdot 10^{-2} A$ při napětí $U_{FI} = 0,22V$. Průměrný sklon křivky v generačně-rekombinační oblasti proudu je $\beta_1 = 18,68 V^{-1}$. Průměrná hodnota sériového odporu kontaktů, pro skupinu vzorků G1, je $R_s = 0,0902\Omega$. Výsledky u skupiny vzorků G1 poukazují na nízkou úroveň přenosových procesů v člancích, v korelaci s vysokou hodnotou proudu a spektrální hustotou napěťového šumu.

3.6.2 Korelace mikroplazmy s výsledky měření šumu

Měřené články jsem po určení přenosových a šumových parametrů jsem analyzoval měřicí metodou pro sledování mikroplazmy, popsané v předchozích kapitolách. Pro sledování mikroplazmy a korelaci s naměřenými šumovými parametry jsem vybral stejné články, které jsou zobrazeny v grafech, pro lepší porovnání výsledků. Články jsem měřil při stejné teplotě, jako v předchozím měření, $T = 300K$, při dvou úrovních závěrného napětí U_R 4V a 8V.

Vzorek	$U_R = 4V$	$U_R = 8V$
G1/4	3,84%	5,62%
G3/1	0,81%	1,2%
G5/1	0,62%	3,8%

Tab. 5 – Procentuální podíl mikroplazmy na povrchu článků.

Jak je z přehledové tabulky s procentuálním podílem mikroplazmy patrné, bodové poruchy generující světlené záření jsou skutečně projevy mikroplazmatických výbojů na PN přechodu, případně na hranách článku. Jejich kvantita resp. kvalita

měřených článků koreluje s naměřenými šumovými parametry a přenosovými vlastnostmi solárních článků.

Na výsledcích měření je mimojiné vidět prokázaná závislost počtu mikroplazem na přiloženém závěrném napětí. V tomto případě bylo závěrné napětí omezeno na hodnotu do 8V, aby nedošlo k nevratným tepelným průrazům, protože měřené články byly určeny k použití v dalším výzkumu.

4 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval objasněním diagnostických metod využívající lokální emisi světla. V prvních kapitolách je uveden teoretický rozbor PN přechodu, výroba a vlastnosti monokrystalických křemíkových solárních článků. Dále jsem do teoretického přehledu zahrnul nejpoužívanější diagnostické metody a popis známých defektů solárních článků. Celý výzkum a vývoj testovacích metod jsem prováděl na monokrystalických křemíkových článcích velikosti 5“, jelikož patří ve své oblasti k nejrozšířenějším.

V praktické části práce jsem se nejprve věnoval úpravám stávajícího měřicího pracoviště a návrhu nového kontaktního pole, které by umožňovalo plyně regulovatelnou změnu teploty článku. Kontaktní pole bylo potřeba vhodně zintegrovat do stávajícího temného boxu s citlivou CCD kamerou. Pro regulaci teploty jsem navrhl a sestrojil regulátor výkonu Peltierových článků, umožňující využívat oba jejich pracovní režimy. Pro analýzu vlastností solárních článků byl použit rozsah teplot od 233K do 363K. Temperování nastavené teploty je řešeno zpětnovazební smyčkou z teplotních čidel. Parazitní teplo je od článků odváděno sestaveným okruhem vodního chlazení.

V praktické části jsem se zaměřil na objasnění metod využívající luminiscenci solárních článků, elektroluminiscenci a mikroplazmu. Cílem výzkumu bylo objasnění vzniku luminiscence na jednotlivých defektech článku a korelace vzniku luminiscence s teplotou článku, napětím a okolními podmínkami. Touto oblastí luminiscence se nikdo dříve nezabýval a vznik luminiscence na článku nebyl detailněji objasněn.

Pro analýzu v praktické části jsem nejdříve použil vzorky, které byly již dříve proměřeny metodou LBIC a byl u nich znám typ defektu, jeho velikost a umístění. Na těchto vzorcích proběhlo ověřující měření metod elektroluminiscence a mikroplazmy pro nalezení vhodných hodnot napětí a proudu pro detekci jednotlivých defektů.

Vlastní výzkum defektů solárních článků jsem prováděl na sadě A, která obsahovala 20 vzorků vyrobených standardním postupem. Z této série jsem po proměření všech kusů vybral ty vzorky, které obsahovaly zdroje mikroplazmy nejen na hranách ale také v ploše. Většina měřených vzorků dále obsahovala vírový defekt v různém rozsahu. Z toho lze soudit, že články nepocházely z jednoho výchozího kusu křemíku.

Hlavní náplní praktické části práce bylo studium a objasnění vzniku mikroplazmy pozorované v solárních článcích. Pro objektivní a rychlé vyhodnocování počtu

zdrojů mikroplazmy v ploše článku jsem vytvořil výpočtový algoritmus v programu Matlab, který pomocí váhování hodnot z obrazu určuje procentuální zastoupení defektů na snímku. S použitím regulace byl vysledován vliv rozdílných teploty na počet defektů, které se projevují v solárním článku. Na obrázku 3 jsou vyobrazeny výrazné zdroje mikroplazmy měřeného článku při dvou teplotách, 303K a 338K. Z grafu na obrázku 4 je zřejmá závislost počtu defektů na teplotě článku. Počet defektů se s rostoucí teplotou a přiloženým napětím zvyšuje exponenciálně. To je způsobeno vyšší koncentrací volných nosičů náboje a jejich energií. Jedním z hlavních výsledků této práce je možnost predikce počtu defektů v monokrystalickém křemíkovém článku v závislosti na teplotě a přiloženém závěrném napětí, díky vzorci č. 7.

Teze o vlivu teploty při diagnostice solárních článků byly publikovány mimojiné v mezinárodních recenzovaných časopisech organizace SPIE (Proceedings of SPIE; ISSN: 0277- 786X) pod názvem Diagnostic methods of solar cells in dependence on temperature a v časopisu organizace ECS (ECS Transactions; ISSN: 1938- 5862) pod názvem Diagnostic Methods of Solar Cell Based on Temperature Dependence. Další významné publikace na toto téma jsou uvedeny v seznamu literatury.

Druhým významným cílem práce bylo objasnění a praktické podložení vzniku mikroplazmy v solárním článku. Pro tuto část jsem použil rastrovací elektronové mikroskopy od firmy FEI Czech republic s.r.o. Menší části solárních článků jsem postupně zkoumal elektronovým svazkem spolu s přiloženým závěrným napětím ve vakuové komoře. Během sledování vzniku mikroplazmy a její následné přesné lokalizaci elektronovým svazkem byla pozorována závislost projevu mikroplazmy na okolním tlaku atmosféry. Pokud byl měřený článek měřen v atmosférickém tlaku, byl vznik mikroplazem stejný jako u předchozích měření v temném boxu. Když byl ale tlak okolního vzduchu snížen na hodnotu řádově 10^{-2} Pa a nižší, začaly nejsilnější mikroplazmy přecházet v tepelné průrazy, jak dokládá tabulka 3. Z detailního zkoumání povrchu solárních článků jsem zjistil, že ke vzniku mikroplazmy dochází v místech s narušeným PN přechodem, zejména při mechanickém poškození jak pyramid na povrchu článku, tak porušením pasivace na hranách. Při mechanickém porušení pasivační vrstvy dochází k obnažení PN přechodu. Nečistoty, které ulpívají na povrchu článků se postupně ionzují a umožňují vznik mikroplazmatického výboje. Čím vyšší je teplota, tím snadněji jsou nečistoty na povrchu ionizovány a dochází tak k silnějším mikroplazmatickým výbojům. Z této teze vyplývá doporučení pro výrobce o nutnosti čistoty během celé výroby a citlivé manipulace s články tak, aby k mechanickému poškození nedocházelo.

Výsledné teze o vzniku a projevech mikroplazmy jsem koreloval s metodami pro měření šumu a přechodových parametrů u nově vyvíjených solárních článků. Korelace vlivu teploty na projev defektů v solárních článcích byla provedena s metodou elektroluminescence, která se ukázala jako spolehlivý nástroj k rychlému porovnání. Výsledky jednotlivých měření byly průběžně předávány firmě Solartec s.r.o. a na jejich základě vznikla řada společných publikací a zejména doporučení ke zkvalitnění výroby.

Cíle stanovené touto prací spočívaly především v objasnění vzniku mikroplazmy v monokrystalickém křemíkovém článku a definování vlivu teploty a okolních podmínek na její vznik. Během řešení práce jsem měřicí pracoviště rozšířil o přesnou regulaci teploty článku. Pro přesné zpracování a analýzu získaných dat jsem vytvořil výpočtové algoritmy v programu Matlab, které usnadňují práci s naměřenými daty. V průběhu detailní analýzy povrchu článku se mi podařilo objasnit příčinu vzniku mikroplazmy na povrchu a hranách monokrystalického křemíkového solárního článku.

Všechny cíle stanovené v této práci byly splněny a výsledné teze byly korelovány s dalšími metodami.

5 LITERATURA

1. Koktavý, P., Šikula, J.; *Reverse Biased P-N Junction Noise in GaAsP Diodes with AvalancheBreakdown Induced Microplasmas*, Fluctuation and Noise Letters, ISSN 0219-4775, 2002, roč. 2, č.2, s. L65 – L70.
2. MACKŮ, R. *Analýza flukтуаčních procesů v solárních článcích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 173 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Koktavý, CSc. Ph.D..
3. Sze, S. M., Kwok, K. Ng.; *Physics of Semiconductor Devices*, third edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007 ISBN-13: 978-0-471-14323-9.
4. Jandová, K.; *Diagnosticke metody plošeného rozložení defektů solárních článků*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 91 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
5. CHOBOLA, Z.: *Impulse noise in silicon solar cells*. Microelectronics Journal, Vol.32/9 (2001), ISSN 0026-2692, pp.707-711.
6. McIntyre, RJ.; *Theory of Microplasma Instability in Silicon*. J. Appl. Phys., June 1961, vol. 32,no. 4, p. 983-995.
7. Potthoff T, Bothe K, Eitner U, et al.; *Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18, pp.100-106, 2010.
8. Swanson, R.; *Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells*, thirty-first IEEE Photovoltaic Specialits conference, 889-94, 2005.
9. CHOBOLA, Z., “*Noise as a tool for non-destructive testing of single-crystal silicon solar-cells*”, in Microelectronics Reliability, vol. 41, no. 12, Dec. 2001, pp. 1947 – 1952.
10. Bishop, J.W.; *Microplasma breakdown and hot-spots in silicon solar cells*, Solar Cells, Volume 26, Issue 4, September 1989, Pages 335-349, ISSN 0379-6787.

6 CURRICULUM VITAE

Jméno: Jan Dolenský
Narozen: 19. 5. 1983 v Trutnově
Adresa: Lomená 36b, Brno, 617 00
Zaměstnání: FEI Czech republic s.r.o., Brno

Email: Dolensky.Jan@seznam.cz

Vzdělání:
2007 – 2014 Doktorské studium na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně
2005 – 2007 Magisterské studium na FEKT VUT v Brně, obor Elektrotechnická výroba a management
2002 – 2005 Bakalářské studium na FEKT VUT v Brně, obor Sdělovací technika
1998 – 2002 Střední průmyslová škola v Trutnově

7 ABSTRACT

This thesis is focused on the area of analysis and diagnostic of monocrystalline solar cells, using local light radiation. Main goals of this thesis are focused on explanation of generation and behavior microplasma in solar cell, in dependence of temperature and reversed bias voltage. As a next focus of this thesis is strong regions of microplasma sources, analyzed by scanning electron microscope and a detailed analysis of edge and surface structure is made.

The influence of the environment (air pressure, level of vacuum and nitrogen gas) on the microplasma generation and behavior is observed in the vacuum chamber of electron microscope.

The results from microplasma method are correlated with noise diagnostic method and on the base of these results are set a new thesis and mathematical equations for the defects behavior in different conditions.

The outcomes of the research are shared with the manufacturer of silicon solar cells, Solartec s.r.o. company. It is the advanced diagnostic methods that allow improving the quality of the production process, through early detection of individual groups of defects.